

# 三聚磷酸钠对热诱导全蛋液凝胶性质的影响

刘鑫<sup>1</sup>, 王步明<sup>2</sup>, 曹龙泉<sup>2</sup>, 耿敏<sup>2</sup>, 苏宇杰<sup>1</sup>, 李俊华<sup>1</sup>, 常翠华<sup>1</sup>, 顾璐萍<sup>1</sup>, 杨严俊<sup>1,\*</sup>

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

2. 高邮市秦邮蛋品有限公司, 江苏扬州 225600)

**摘要:** 本文以新鲜的全蛋液为实验原料, 在不同加热温度和不同三聚磷酸钠(Sodium Tripolyphosphate, STPP)添加量下对其进行热处理, 通过对全蛋凝胶质构、色泽、蒸煮损失、持水性、低场核磁共振(LF-NMR)的分析测定, 探究了STPP对热诱导全蛋液凝胶性质的影响。当加热温度从80℃升高到95℃时, 蛋白凝胶网络结构变得更加稳定, 全蛋液凝胶强度增加, 当STPP添加比例从0.0%增加到0.6%时, 凝胶的硬度和弹性呈现先增大后减小的趋势, 在添加量为0.2%时, 凝胶硬度、弹性都达到最高。并利用低场核磁共振(LF-NMR)技术检测了凝胶内部不同水分的状态变化, 当加热温度从80℃升高到90℃时,  $T_{21}$ (结合水)和 $T_{22}$ (中间态水)峰值弛豫时间保持不变,  $T_{23}$ (自由水)逐渐增加, 当加热温度为95℃时, 自由水含量增加, 中间态水减少; 当STPP添加量从0.2%增加到0.6%时, 结合水结合更加紧密, 中间态水逐渐增多。综合各种指标分析, 结果表明STPP的添加改善了全蛋液热诱导凝胶的质构特征和颜色特征, 增强了凝胶持水力。实验结果为热凝固蛋制品的开发与改良提供参考。

**关键词:** 三聚磷酸钠, 温度, 全蛋凝胶, 质构

## Effects of Sodium Tripolyphosphate on the Gel Properties of Whole Egg by Thermal Induction

LIU Xin<sup>1</sup>, WANG Bu-ming<sup>2</sup>, CAO Long-quan<sup>2</sup>, GENG Min<sup>2</sup>, SU Yu-jie<sup>1</sup>, LI Jun-hua<sup>1</sup>,  
CHANG Cui-hua<sup>1</sup>, GU Lu-ping<sup>1</sup>, YANG Yan-jun<sup>1,\*</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Gaoyou City Qinyou Egg Products Co., Ltd., Yangzhou 225600, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of sodium tripolyphosphate (STPP) on the gel properties of heat-induced whole egg gel were investigated using fresh whole egg liquid as the experimental material. Results showed that the heating temperature and STPP concentration had an influence on the texture, color, the presence of water, water holding capacity and LF-NMR of egg gel. As the heating temperature increased from 80 °C to 95 °C, the structure of the protein gel network became more stable, with coinciding increase in the gel strength. While the STPP concentration increased from 0.0% to 0.6%, the hardness and springiness of the gel increased first and then decreased. Thereinto, the gel got the highest hardness and springiness at the addition amount of STPP 0.2%. Moreover, the state of different water inside the gel was detected by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) technology. When the heating temperature was raised from 80 °C to 90 °C, the peak relaxation time of  $T_{21}$  and  $T_{22}$  remained unchanged, while  $T_{23}$  increased gradually. The free water content increased, the intermediate water decreased when the heating temperature was 95 °C. When STPP was added from 0.2% to 0.6%, the immobilized water combined more closely, and the content of intermediate water gradually increased. Combined with various indicators analysis, the results showed that the addition of STPP can improve the texture, color characteristics and the water holding capacity of the heat-induced whole egg gel. The results provided reference for the development and improvement of thermal coagulation egg products.

**Key words:** sodium tripolyphosphate; temperature; whole egg gel; texture

中图分类号: TS202

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)08-0202-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.034

引文格式: 刘鑫, 王步明, 曹龙泉, 等. 三聚磷酸钠对热诱导全蛋液凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 202-206, 220.

收稿日期: 2018-07-16

作者简介: 刘鑫(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 蛋白质结构与功能, E-mail: 15006181185@163.com。

\* 通讯作者: 杨严俊(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 蛋白质结构与功能, E-mail: yangyj@jiangnan.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400303); 扬州市科技计划(YZ2017038)。

鸡蛋是一种营养丰富易被消化吸收的高蛋白食物,对人体而言,鸡蛋的蛋白质品质最佳,仅次于母乳,是人们日常生活不可或缺的营养食品之一,蛋与蛋制品在国民经济中占有重要地位。鸡蛋中的蛋白质具有多种功能特性,如凝胶作用、持水性、起泡性和乳化性等,在食品的制造加工中有重要的作用。变性的蛋白质分子聚集并形成有序的蛋白质网络结构过程称为胶凝作用<sup>[1]</sup>。胶凝性是蛋白质的重要功能性质,凝胶的形成可以改善食品的形态,质地,提高食品的持水力、增稠等诸多应用<sup>[2]</sup>。全蛋液作为一种液态蛋制品和加工原料,有良好的加工特性,保留了新鲜鸡蛋的风味、营养以及功能性质,使其在快餐食品、烘焙糕点、冰淇淋、面包等食品的加工中具有重要的应用<sup>[3]</sup>。

磷酸盐在食品加工中主要是作水分保持剂、品质改良剂、乳化分散剂、缓冲剂、螯合剂、营养增补剂、pH 调节剂、发酵膨松剂等<sup>[4]</sup>,在肉制品、速冻食品、饮料工业、蔬菜水果以及海产品加工中广泛应用<sup>[5]</sup>。Kılıç, B 等<sup>[6]</sup>研究发现焦磷酸钠、三聚磷酸钠、六偏磷酸钠可以减少鸡肉牛肉蒸煮损失。Wang Peng 等<sup>[7]</sup>发现磷酸盐可以增加肉制品体系 pH,促使肌原纤维蛋白凝胶形成紧密有序的网络结构,增加凝胶硬度和持水力。相对于其他磷酸盐来说,三聚磷酸钠具有较高的水溶解性,是最常用的一种磷酸盐<sup>[8]</sup>。段昌圣等<sup>[8]</sup>研究了三聚磷酸钠添加量和冷藏时间对冷冻鸭肉色泽、持水性、质构参数等品质特性的影响,发现三聚磷酸钠浸泡鸭肉后可显著改善鸭肉的质构,提高鸭肉的持水性。刘丽莉等<sup>[9]</sup>和张根生等<sup>[10]</sup>采用三聚磷酸钠对鸡蛋清蛋白进行磷酸化改性,并针对蛋清液的溶解性,起泡性,乳化性等功能性质进行了探讨,未对蛋清蛋白的凝胶性质进行研究。在鸡蛋蛋白热诱导凝胶机制的初始阶段,蛋白质的二级和三级结构在加热过程中受到破坏而发生变性,蛋白质内部的疏水区域暴露出来,使得蛋白质之间发生交联,从而形成凝胶<sup>[11]</sup>。鸡蛋蛋白质的凝胶形成需要一定的温度<sup>[12]</sup>,加热温度对于凝胶的硬度和弹性等性质都有显著的影响<sup>[13]</sup>。本实验研究了三聚磷酸钠和温度对全蛋液凝胶性质的影响,旨在为热凝固蛋制品如鸡蛋干的生产加工提供一定理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

鲜鸡蛋 市售;食品级三聚磷酸钠 湖北兴发化工集团股份有限公司;塑封袋 安徽美翔塑业有限公司;其它试剂 均为分析纯。

TA-XT plus 型物性分析仪 英国 Stable Micro Systems 公司;UltraScan Pro1166 型高精度分光测色仪 美国 HunterLab 公司;MesoMR23-060V-I 型低场核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;HWS24 型电热恒温水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司;C-MAG HS7 型磁力搅拌器 德国 IKA 公司;EL3002 型电子天平 瑞士 METTLER TOLEDO;5430 R 型高速离心机 德国 eppendorf 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 样品的制备

1.2.1.1 不同温度的处理 选择新鲜无破损的鸡蛋,洗净后手工破壳,在室温下用磁力搅拌器充分混匀,每份称取 5 g 左右混合均匀的全蛋液置于 10 mL 小烧杯中,分别在 80、85、90 和 95 °C 恒温水浴锅中加热 30 min。加热完成后立即放入冰水中冷却,并在 4 °C 下储存过夜使凝胶成熟,次日取出恢复至室温后分别测定样品的各项指标。

1.2.1.2 不同三聚磷酸钠添加量的处理 选择新鲜无破损的鸡蛋,洗净后手工破壳,在室温下用磁力搅拌器充分混匀,每份称取 5 g 左右混合均匀的全蛋液置于 10 mL 小烧杯中,分别加入质量分数为 0、0.2%、0.4%、0.6% 的三聚磷酸钠,搅拌均匀后在 90 °C 恒温水浴锅中加热 30 min,加热完成后立即放入冰水中冷却,并在 4 °C 下储存过夜使凝胶成熟,次日取出恢复至室温后分别测定样品的各项指标。

1.2.2 质构特性的测定(TPA) 质构测定采用 TA-XT plus 物性分析仪,对制备好的凝胶样品采用 TPA 模式进行质构分析,参照邓利玲<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改。样品是高度为 10 mm,直径为 20 mm 的圆柱体,采用直径 12.7 mm 的 P/36R 平底型探头。使用 Texture Expert 软件版本 1.22 由力-时间变形曲线计算硬度,粘性,咀嚼性,弹性,内聚性和弹性。质构测定参数:测试前速 5 mm/s;测试速度 1 mm/s;测试后速 1 mm/s;压缩模式:样品形变量 50%,触发点负载 5 g。每个样品平行 5 次测定相关质构指标。

1.2.3 色差测定 将凝胶样品密封在塑封袋中,先使用 UltraScan Pro1166 型高精度分光测色仪进行标准黑板和白板背景校准,以空白塑封袋为空白对照,然后依次测量样品的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值,其中  $L^*$  值表示亮度(0 = 黑色,100 = 白色), $a^*$  值表示红绿色度( $-a^*$  = 绿色,  $+a^*$  = 红色), $b^*$  值表示黄蓝色度( $-b^*$  = 蓝色,  $+b^*$  = 黄色)。每个样品测定三个不同的点并取平均值<sup>[15]</sup>。

1.2.4 蒸煮损失的测定 计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$\text{蒸煮损失}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: $m_1$  为蒸煮前烧杯和相应全蛋溶液的总质量(g); $m_2$  为煮制后的总质量(g); $m$  为烧杯质量(g)。

1.2.5 持水性(Water Holding Capacity, WHC)的测定

持水性的测定参照 Hu 等<sup>[16]</sup>的方法并稍作修改。将制好的全蛋凝胶切成大小一致的小块状,用滤纸包裹后放于 50 mL 离心管中,以 6000 r/min 转速离心 10 min,然后用滤纸将表面水分吸干后称重。凝胶持水性计算公式如下:

$$\text{WHC}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: $m_1$ :离心前样品凝胶重量(g); $m_2$ :离心后样品凝胶重量(g)

1.2.6 低场核磁自旋-自旋弛豫特性分析 参照 Goetz<sup>[17]</sup>的方法并略作修改,利用低场核磁共振成像分析仪检测全蛋凝胶中不同水分种类的含量及分布

情况,吸干样品表面水分,将大约 5 g 的凝胶样品用保鲜膜包好,放入直径 25 mm 的专用圆柱形核磁共振管中,置于永久磁场中心位置的射频线圈中心,利用 FID 信号调节共振中心频率,利用 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 脉冲序列测定样品的自旋-自旋弛豫时间( $T_2$ ),设置参数为:主频 SF:21 MHz;回波时间 TE:0.5 ms;等待时间 TW:5000 ms;信号叠加 NS:4;前置放大倍数 PRG:1。用仪器配套的 Multi-ExPInv Analysis 软件拟合反演 CPMG 指数衰减曲线,得到样品的  $T_2$  弛豫信息。

### 1.3 数据处理

所有数据利用 Microsoft Excel 2007 进行统计处理,采用 Origin 8.0 进行作图分析,SPSS 17.0 进行统计学分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度和三聚磷酸钠对凝胶质构的影响

鸡蛋蛋白质的热诱导凝胶过程是一个伴随复杂化学反应的过程,主要靠氢键、疏水相互作用、静电相互作用、二硫键等作用力形成和维持蛋白质凝胶稳定结构,凝胶过程是一个动态过程,受外界环境 pH、离子强度及加热温度和时间的影响<sup>[18]</sup>。鸡蛋蛋白质凝胶的形成主要就是蛋白质分子的聚集过程,在聚集的过程中,依靠蛋白质-蛋白质、蛋白质-溶剂间的相互作用,当吸引力和排斥力达到平衡状态时,蛋白质分子之间就形成了高度有序的三维网络结构。

由表 1 可以看出,全蛋凝胶的硬度、胶着性和咀嚼性随着温度的升高均有显著升高( $p < 0.05$ ),在 95 °C 时达到最大,弹性、内聚性和回复性均上升,但是差异不显著( $p > 0.05$ )。鸡蛋蛋白质在一定的温度下形成热诱导凝胶,且鸡蛋中含有的蛋白质种类较多,各种蛋白质具有不同的变性温度<sup>[19]</sup>,因此加热温度会对凝胶质构特性产生较大的影响。在加热的过程中,天然蛋白质受热展开,二级和三级结构被破坏,内部的疏水区域暴露出来,随着温度的升高,变性的蛋白质分子与相邻的结构相似的未展开蛋白质分子相互作用增强,导致高分子量聚集体数量增多,

且凝集物之间发生进一步的反应,使得蛋白凝胶网络结构更加稳定,全蛋的凝胶强度增加<sup>[13]</sup>。

由表 2 可得,相比对照组,添加 STPP 后凝胶品质得到明显改善,硬度、胶着性、咀嚼性、内聚性、回复性均有显著提高( $p < 0.05$ ),STPP 为碱性磷酸盐,添加 STPP 后体系 pH 升高,呈弱碱性,偏离蛋白质等电点,从而增加了蛋白质表面负电荷,使蛋白质之间的静电相互作用增强,从而使凝胶强度增大<sup>[20]</sup>。当 STPP 添加量为 0.2% 时,全蛋液凝胶的硬度达到最大值,随着 STPP 添加量从 0.2% 增加到 0.6%,凝胶硬度反而呈现下降趋势。其原因可能是虽然 STPP 添加量增多,但是蛋白质侧链可引入的磷酸根基团已趋于饱和,过量的磷酸基团也不会再进行交联,相反会破坏凝胶分子间的氢键相互作用<sup>[21]</sup>,从而导致凝胶强度开始下降。

### 2.2 温度和三聚磷酸钠对凝胶色泽及外观的影响

不同温度和 STPP 添加量对全蛋液凝胶外观的影响如图 1 和图 2 所示,当加热温度从 80 °C 上升到 95 °C 时,凝胶外观颜色由淡黄色逐渐变为墨绿色,且在 95 °C 时,可以观察到很多孔洞结构,可能是因为温度为 95 °C 时,接近蛋液中水分的沸点,溶解在蛋液中的空气溢出,在蛋液形成热诱导凝胶的过程中,空气被包裹在全蛋凝胶结构中,形成肉眼可见的多孔结构。当 STPP 添加量从 0.2% 增加到 0.6% 时,凝胶外观孔洞逐渐减少,是因为随着 STPP 添加量的增多,液膜包裹空气能力下降,蛋白起泡性降低<sup>[10]</sup>。

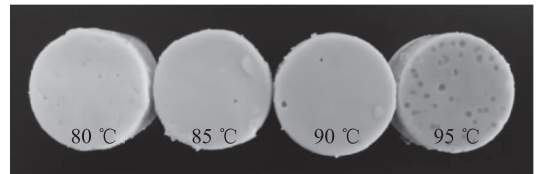


图 1 不同加热温度下全蛋凝胶照片  
Fig.1 Digital photograph of whole egg gel with different heating temperatures

高精度分光测色仪测定结果如图 3 和图 4 所示,由两图中可以看出,在不同温度和 STPP 添加量下,

表 1 温度对全蛋凝胶质构的影响

Table 1 Effect of different heating temperatures on the texture of whole egg gel

加热温度(°C)	硬度(g)	胶着性(g)	咀嚼性(g)	弹性	内聚性	回复性
80	1669.48 ± 78.77 <sup>a</sup>	1207.19 ± 63.38 <sup>a</sup>	1123.18 ± 91.67 <sup>a</sup>	0.83 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.00 <sup>a</sup>
85	1979.65 ± 86.68 <sup>b</sup>	1435.94 ± 56.14 <sup>b</sup>	1201.66 ± 52.35 <sup>a</sup>	0.84 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>a</sup>
90	2207.36 ± 107.8 <sup>c</sup>	1609.18 ± 55.13 <sup>c</sup>	1452.57 ± 56.64 <sup>b</sup>	0.90 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.35 ± 0.02 <sup>a</sup>
95	2544.81 ± 80.96 <sup>d</sup>	1869.74 ± 82.34 <sup>d</sup>	1709.61 ± 75.15 <sup>c</sup>	0.91 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.74 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.00 <sup>a</sup>

注:不同字母表示不同加热温度之间的差异显著性( $p < 0.05$ ),表 2 同。

表 2 三聚磷酸钠对全蛋凝胶质构的影响

Table 2 Effect of different STPP concentrations on the texture of whole egg gel

添加比例(%)	硬度(g)	胶着性(g)	咀嚼性(g)	弹性	内聚性	回复性
0.0	2374.62 ± 85.577 <sup>a</sup>	1704.67 ± 70.68 <sup>a</sup>	1511.93 ± 32.56 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>a</sup>
0.2	2851.79 ± 9.72 <sup>c</sup>	2186.37 ± 4.39 <sup>d</sup>	1984.39 ± 14.13 <sup>c</sup>	0.91 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.77 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>b</sup>
0.4	2759.90 ± 70.88 <sup>b</sup>	2140.72 ± 84.51 <sup>c</sup>	1815.89 ± 53.98 <sup>ab</sup>	0.85 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.78 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.40 ± 0.01 <sup>b</sup>
0.6	2750.11 ± 18.37 <sup>b</sup>	2086.72 ± 21.42 <sup>b</sup>	1667.04 ± 49.61 <sup>b</sup>	0.80 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.76 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.38 ± 0.00 <sup>b</sup>

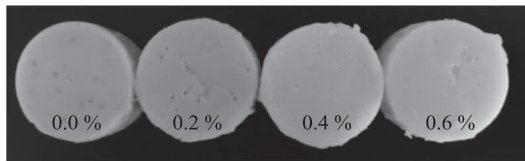


图2 不同三聚磷酸钠添加比例下全蛋凝胶照片

Fig.2 Digital photograph of whole egg gel with different STPP concentrations

凝胶的亮度  $L^*$ 、红值  $a^*$ 、黄值  $b^*$  均有显著变化 ( $p < 0.05$ )。当温度从 80 °C 增加到 95 °C 时,凝胶的亮度  $L^*$ 、红值  $a^*$  和黄值  $b^*$  都逐渐降低,而添加 STPP 时出现相反的规律,随着 STPP 添加量的增多,凝胶的亮度、红值和黄值都逐渐增加,这和王也<sup>[20]</sup>的研究结论相一致。出现这些颜色的变化可能是受到硫化亚铁和脂溶性类胡萝卜素及其衍生物联合影响<sup>[22]</sup>。鸡蛋中大部分铁元素和类胡萝卜素都存在于蛋黄中,随着温度的升高,半胱氨酸和甲硫氨酸这些含硫氨基酸降解产生硫,与金属亚铁离子结合生成绿色硫化亚铁,与蛋黄中的黄色素形成黄绿色外观。在添加 STPP 的一组样品中,磷酸盐具有较好的金属离子螯合能力,与金属离子形成络合物,减少了金属硫化物的产生,能够显著改善全蛋凝胶色泽。

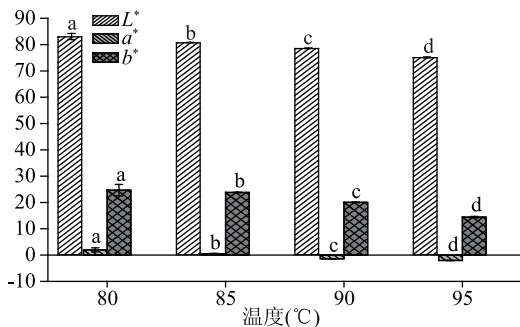


图3 不同加热温度对全蛋凝胶色泽的影响

Fig.3 Effect of different heating temperatures on color characteristics of whole egg gel

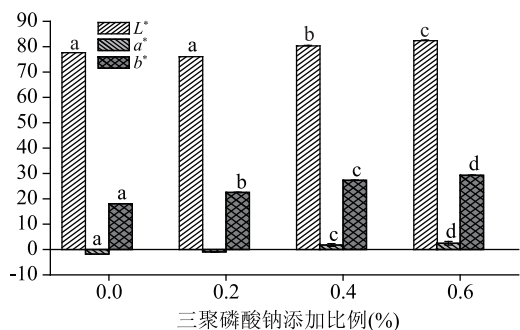


图4 不同三聚磷酸钠添加比例对全蛋凝胶色泽的影响

Fig.4 Effect of different STPP concentrations on color characteristics of whole egg gel

### 2.3 温度和 三聚磷酸钠对凝胶蒸煮损失和持水性的影响

温度和 STPP 添加量对全蛋液凝胶的蒸煮损失和持水性的影响如图 5 和图 6 所示,随着加热温度的增加,凝胶蒸煮损失也逐渐增加,持水性呈现逐渐下

降趋势,可能是蒸煮过程中,温度增加导致水分散失速度加快,且 95 °C 加热时,凝胶持水性显著下降 ( $p < 0.05$ ),从直观图中可以看出,加热温度为 95 °C 时形成的凝胶有较多孔洞结构,孔洞内部会包裹较多的水分,在高速离心的过程中容易析出,故持水性较差。

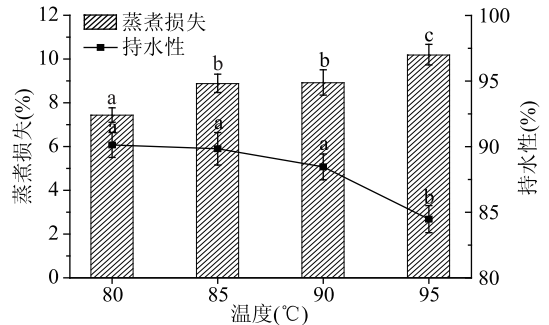


图5 不同加热温度对全蛋凝胶蒸煮损失和持水性的影响

Fig.5 Effect of different heating temperatures

on cooking loss and water holding capacity of whole egg gel

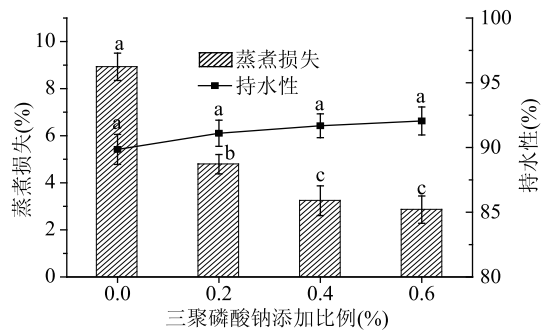


图6 不同三聚磷酸钠添加比例

对全蛋凝胶蒸煮损失和持水性的影响

Fig.6 Effect of different STPP concentrations

on cooking loss and water holding capacity of whole egg gel

而添加了磷酸盐的样品蒸煮损失较小,相对于对照组有显著降低 ( $p < 0.05$ ),凝胶持水性相对于对照组也有提高,当 STPP 添加量增多时,凝胶持水性也有一定改善,但是增加不显著 ( $p > 0.05$ )。STPP 溶液偏碱性,使得溶液 pH 大于蛋白质等电点, pH 的增加使蛋白质所带电量增加,同时磷酸基团的引入使蛋白质体系的电负性增强,分子间的静电斥力增大,形成了良好的凝胶网络结构,因此持水性变大。这与磷酸盐提高肌原纤维蛋白凝胶持水性的原理类似<sup>[5]</sup>。

### 2.4 全蛋凝胶 LF-NMR 分析

LF-NMR 是利用氢质子(以水中的氢质子为主)与基质的结合强度不同,引起共振的射频在激发时和激发后其相位变化,能量传递后复原所需时间,即弛豫时间  $T_2$  的差异来分辨水分的存在状态,且水分含量的不同会导致信号幅度、反演峰面积的不同。横向弛豫时间  $T_{21}$  (10 ms 以下)代表结合水,表示主要通过化学作用力结合到蛋白质分子上的水分子,  $T_{22}$  (10~100 ms)代表不易流动的中间态水,表示存在于蛋白质致密的网络结构之间的不易流动的水分子,  $T_{23}$  (100~1000 ms)代表自由水,存在于凝胶空间网络结构外部能自由流动的水<sup>[23]</sup>,  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  分别代

表3 不同加热温度下全蛋凝胶的横向弛豫时间及峰面积比例

Table 3 Relaxation time and peak proportion of whole egg gel at different heating temperatures

加热温度(°C)	T <sub>21</sub> (ms)	T <sub>22</sub> (ms)	T <sub>23</sub> (ms)	A <sub>21</sub> (%)	A <sub>22</sub> (%)	A <sub>23</sub> (%)
80	0.76	37.65	811.13	2.08	96.45	1.47
85	0.76	37.65	932.60	1.44	97.98	0.58
90	0.76	37.65	1232.85	1.42	97.43	1.15
95	0.87	32.75	932.60	1.19	84.04	14.77

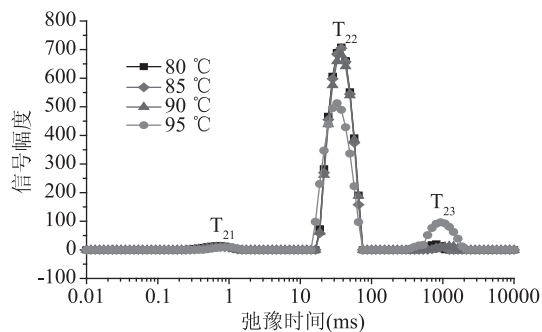
表4 不同三聚磷酸钠添加比例下全蛋凝胶的横向弛豫时间及峰面积比例

Table 4 Relaxation time and peak proportion of whole egg gel at different concentrations of STPP

添加比例(%)	T <sub>21</sub> (ms)	T <sub>22</sub> (ms)	T <sub>23</sub> (ms)	A <sub>21</sub> (%)	A <sub>22</sub> (%)	A <sub>23</sub> (%)
0.0	0.76	32.75	1072.27	1.54	93.22	5.24
0.2	1.15	43.29	533.67	2.25	95.32	2.43
0.4	1	43.29	464.16	1.86	97.18	0.96
0.6	0.66	43.29	533.67	1.68	96.88	1.44

表不同峰的比例。

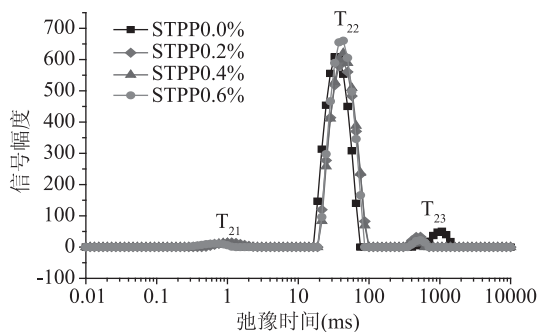
由图7和表3可以得出,全蛋凝胶T<sub>2</sub>谱有3个峰,其中不易流动水含量最多,占全部水分的90%以上,温度对全蛋凝胶不易流动水和自由水影响较大,加热温度从80℃升高到90℃时,T<sub>21</sub>和T<sub>22</sub>峰值弛豫时间保持不变,T<sub>23</sub>逐渐增加,加热温度为95℃时,T<sub>23</sub>峰面积显著升高,T<sub>22</sub>峰面积显著降低,这可能是由95℃加热时凝胶形成的多孔结构导致的,孔洞结构中包裹了较多的自由水,也使得束缚在蛋白质凝胶网络结构中的不易流动水含量减少。

图7 不同加热温度下全蛋凝胶的T<sub>2</sub>弛豫分布曲线Fig.7 T<sub>2</sub> relaxation distribution curves of whole egg gel at different heating temperatures

从图8和表4中可以看出,STPP添加量从0.2%增加到0.6%时,T<sub>21</sub>弛豫峰左移,可能是由于蛋白质的溶解度提高,蛋白质和水结合更加紧密<sup>[22]</sup>。T<sub>22</sub>峰值弛豫时间保持不变,都为43.29 ms,而峰面积逐渐增大,说明不易流动水随着STPP的增加而逐渐增多;相对于对照组,添加磷酸盐后T<sub>23</sub>峰面积变小表明自由水流动性降低,原因是添加磷酸盐后,蛋白质带电量增加,分子间斥力增大,形成持水的空间网络结构,更多的自由水被束缚在网络结构中,表明添加STPP后凝胶持水性有所提高,蛋白质分子与水分子结合更加紧密。

### 3 结论

本文研究了三聚磷酸钠对热诱导全蛋液凝胶性质的影响,发现温度和STPP对凝胶质构特征、颜色、持水性以及水分存在状态均有一定影响。当加热温

图8 不同三聚磷酸钠添加比例下全蛋凝胶的T<sub>2</sub>弛豫分布曲线Fig.8 T<sub>2</sub> relaxation distribution curves of whole egg gel at different concentrations of STPP

度从80℃升高到95℃时,蛋白凝胶网络结构变得更加稳定,全蛋的凝胶硬度从1669.48 g升高到2544.81 g,颜色由黄色逐渐变为墨绿色,当STPP添加比例从0.0%增加到0.6%时,凝胶的硬度和弹性呈现先增大后减小的趋势,在添加量为0.2%时,凝胶硬度、弹性都达到最高,并利用LF-NMR技术检测了凝胶内部水分的状态变化,当加热温度从80℃升高到90℃时,T<sub>21</sub>和T<sub>22</sub>峰值弛豫时间保持不变,T<sub>23</sub>逐渐增加,当加热温度为95℃时,自由水含量增加,中间态水减少;当STPP添加量从0.2%增加到0.6%时,结合水结合更加紧密,中间态水逐渐增多。结果表明STPP的添加改善了凝胶的质构特征和颜色特征,增强了凝胶持水力,这为热凝固蛋制品的开发与研究提供参考。

### 参考文献

- [1] H D Belitz, W Grosch, P Schieberle. 食品化学:第3版[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
- [2] 李俐鑫,迟玉杰,孙波,等.蛋清蛋白凝胶特性影响因素的研究[J].食品科学,2008,29(3):54-57.
- [3] 苏宇杰,徐珍珍,乔立文,等.全蛋液pH对其功能性质的影响[J].食品与发酵工业,2012,38(11):63-67.
- [4] 刘锐萍,裴庆润,张铁军,等.食品中磷酸盐的应用现状及

(下转第220页)

分析及综合评判[J].经济林研究,2015,33(3):7-12,32.

[9]陈杭君,曹颖,郗海燕,等.不同品种荔枝品质特性及聚类分析评价[J].中国食品学报,2013,13(5):198-210.

[10]李伟,郗海燕,陈杭君,等.基于主成分分析的不同品种杨梅果实综合品质评价[J].中国食品学报,2017,17(6):161-171.

[11]闫鹏,王继勋,马凯,等.中亚大樱桃与甜樱桃一年生枝条的抗寒性研究[J].新疆农业科学,2013,50(9):1620-1625.

[12]龚鹏,杨波,车玉红,等.几个甜樱桃品种及其砧木在新疆喀什的生长适应性研究初探[J].新疆农业科学,2008(4):623-626.

[13]马凯,韩立群,闫鹏,等.中亚大樱桃与甜樱桃果实性状分析与评价[J].新疆农业科学,2015,52(6):1014-1020.

[14]丁礼琴,刘力,徐德生.蒽酮-硫酸法测定生地黄提取物中总糖的含量[J].上海医药,2008(8):368-370.

(上接第206页)

存在问题分析[J].饮料工业,2007,10(2):9-11.

[5]李宝升,王修俊,邱树毅,等.磷酸盐及其在食品中的应用[J].中国调味品,2009,34(7):38-41.

[6] Kılıç B, Şimşek A, Claus J R, et al. Impact of added encapsulated phosphate level on lipid oxidation inhibition during the storage of cooked ground meat[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(2):C359-C68.

[7] Wang, Peng, Xing-Lian, et al. Effects of meat and phosphate level on water-holding capacity and texture of emulsion-type sausage during storage[J]. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(12):1475-1481.

[8]段昌圣,赵双娟,黄文,等.三聚磷酸盐对鸭肉品质的影响[J].食品科学,2013,34(7):62-66.

[9]刘丽莉,向敏,康怀彬,等.鸡蛋清蛋白磷酸化改性及功能性质的研究[J].食品工业科技,2013,34(6):154-158.

[10]张根生,李婷婷,丁健,等.巴氏杀菌鸡蛋清液磷酸化改性及性质研究[J].食品与机械,2017,33(1):11-15.

[11] Clark A H, Kavanagh G M, Ross-Murphy S B. Globular protein gelation—theory and experiment[J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(4):383-400.

[12] Denmat M L, Anton M, Gandemer G. Protein denaturation and emulsifying properties of plasma and granules of egg yolk as related to heat treatment[J]. Journal of Food Science, 2010, 64(2):194-197.

[13]周长旭.鸡蛋热诱导凝胶形成及凝胶特性的研究[D].南京:南京农业大学,2012.

[14]邓利玲,张帅,宋倩,等.添加魔芋葡甘聚糖对鸡蛋干品

(上接第214页)

物测定试验准则杀菌剂第1部分:抑制病原真菌孢子萌发试验 凹玻片法[S].北京:中国农业出版社,2006.

[36] Chen C, Long L, Zhang F, et al. Antifungal activity, main active components and mechanism of *Curcuma longa* extract against *Fusarium graminearum* [J]. Plos One, 2018, 13(3):e0194284.

[37]中华人民共和国农业部.NY/T 1156.2-2006,农药室内生物测定试验准则杀菌剂第2部分:抑制病原真菌菌丝生长试

[15]崔天舒.甜樱桃果实风味品质及花色苷组分的研究[D].泰安:山东农业大学,2014.

[16]夏永秀.9个甜樱桃品种特性比较与评价及其选优研究[D].雅安:四川农业大学,2011.

[17]蔡宇良,李珊,陈怡平,等.不同甜樱桃品种果实主要内含物测试与分析[J].西北植物学报,2005(2):304-310.

[18]蔡宇良,魏旭,韩明玉,等.中晚熟硬肉耐贮藏甜樱桃——艳阳[J].西北园艺(果树),2005(6):30-31.

[19]李青云,葛会波,张广华,等.日光温室草莓果实生长发育过程中糖、酸和  $V_C$  变化动态的研究[J].河北农业大学学报,2002(2):46-48,70.

[20]杨利玲,杜娟,吴春燕,等.冬春季市售主要水果中  $V_C$  含量测定与营养分析[J].北方园艺,2011(3):37-38.

[21]王聘.新疆小白杏果实采收后贮藏保鲜的研究[D].南京:南京农业大学,2012.

质的影响[J].食品科学,2017,38(23):106-112.

[15] Santipanichwong R, Suphantharika M. Carotenoids as colorants in reduced-fat mayonnaise containing spent brewer's yeast  $\beta$ -glucan as a fat replacer[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(4):565-574.

[16] Hu H, Fan X, Zhou Z, et al. Acid-induced gelation behavior of soybean protein isolate with high intensity ultrasonic pre-treatments[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1):187.

[17] Goetz J, Koehler P. Study of the thermal denaturation of selected proteins of whey and egg by low resolution nmr[J]. LWT - Food Science and Technology, 2005, 38(5):501-512.

[18]胡坤,方少瑛,王秀霞,等.蛋白质凝胶机理的研究进展[J].食品工业科技,2006,27(6):202-205.

[19] Holt D L, Watson M A, Dill C W, et al. Correlation of the rheological behavior of egg albumen to temperature, pH, and NaCl concentration [J]. Journal of Food Science, 1984, 49(1):137-141.

[20]王也,黄茜,马美湖.磷酸盐对全蛋液鸡蛋干质构和色泽特性的影响[J].食品工业科技,2015,36(15):265-269.

[21] Nakai S, Li-Chan E. Hydrophobic interactions in food systems[M]. CRC Press, Inc, 1988.

[22] Li J, Wang C, Zhang M, et al. Effects of selected phosphate salts on gelling properties and water state of whole egg gel[J]. Food Hydrocolloids, 2017; S0268005X1730958X.

[23]段云霞,赵英,迟玉杰.基于低场核磁共振技术分析不同贮藏条件下白煮蛋水分分布及品质变化[J].食品科学,2018, 39(9):26-32.

验 平皿法[S].北京:中国农业出版社,2006.

[38] Islam M R, Jeong Y T, Ryu Y J, et al. Isolation, identification and optimal culture conditions of *Streptomyces albidoflavus* C247 producing antifungal agents against *Rhizoctonia solani* AG2-2 [J]. Mycobiology, 2009, 37(2):114-120.

[39]胡春红,李俐俐,刘坤,等.食品防腐剂对产毒黄曲霉孢子萌发及菌丝生长的抑制作用研究[J].食品工业科技,2014, 35(15):282-285.